

2004 年度 卒業研究レポート

**SPring-8 で使用する偏極標的用の  
希釈冷凍器の最終熱交換器の製作  
と性能評価**

山形大学 理学部 物理学科  
クオーク核物理研究室 4年  
01312029  
野村 卓美

## 概要

現在 SPring-8 で使用するために開発している偏極標的がある。  
偏極標的で偏極させた物質を用いて様々な実験をしている。偏極標的のシステムとしては大きく 5 つ

- ・ 電磁石系
- ・ 冷却系
- ・ 温度測定系
- ・ マイクロ波系
- ・ NMR 系

に分けられる。そのうちの冷却系（希釈冷凍器）における最終熱交換器を設計、製作しその性能を計算で評価し使用できるか確かめた後 Spring-8 で使用する。

# 目次

<b>第 1 章 目的</b>	4
1.1 研究の目的	4
<b>第 2 章 周辺機器</b>	4
2.1 偏極標的	4
2.2 希釈冷凍器(Dilution Refrigerator)	5
2.2.1 希釈冷凍器(Dilution Refrigerator)	5
2.2.2 希釈冷凍法(Dilution Refrigeration)	6
2.3 最終熱交換器(Heat Exchanger)	7
<b>第 3 章 Heat Exchanger の製作</b>	7
3.1 設計	7
3.2 製作工程	9
3.3 材料	14
<b>第 4 章 性能評価</b>	15
4.1 熱伝導	15
4.2 カピッツア抵抗 (境界面抵抗)	15
4.3 Heat Exchanger の熱量速度	15
4.3.1 Cu 中での熱量速度	16
4.3.2 境界面での熱量速度	17
4.3.3 全体での熱量速度	20
4.4 評価	23

## 第4章 考察 24

### 5.1 考察・・・24

## 第5章 まとめ 24

### 6.1 まとめ・・・24

### 参考文献・・・24

## 図表目次

- 図 1. 希釈冷凍器(Dilution Refrigerator)・・・6
- 図 2. 希釈冷凍器、シールドのサイズ・・・7
- 図 3. Heat Exchanger 完成図・・・8
- 図 4. テフロンチューブ成型・・・9
- 図 5. 銅パイプ挿入・・・9
- 図 6. 銅パイプ成型・・・10
- 図 7. 銅板・・・10
- 図 8. エンドキャップ・・・11
- 図 9. アルミ角パイプ・・・11
- 図 10. テフロン板はめ込み・・・12
- 図 11. アルミ角パイプ装着・・・12
- 図 12. Heat Exchanger・・・13
- 表 1. Heat Exchanger 各点の熱量速度・・・22

# 第 1 章 目的

## 1.1 研究の目的

現在 SPring-8 で使用するために開発している偏極標的の一部分である希釈冷凍機における最終熱交換器(Heat Exchanger)を製作しその性能評価をする。

# 第 2 章 周辺機器

## 2.1 偏極標的

原子核のスピンを特定の方向に偏らせた標的を偏極標的という。偏極させるには高磁場、極低温の状態にある特定の周波数のマイクロ波を照射する必要がある。偏極標的のシステムは大きく 5 つに分けられる。

1. 電磁石系  
高磁場をつくる。(約 2.5K)
2. 冷却系  
極低温を作る。(約 0.1K)
3. 温度測定系  
極低温の温度を測定する。
4. マイクロ波  
特定のマイクロ波を供給する。(約 70GHz)
5. NMR 系  
偏極度を測定する。

まず、標的として偏極したい原子核を含む物質に不対電子をドーピングする。そしてその系を高磁場、極低温中に置くと原子核に比べ電子のもつ磁気モーメントは非常に大きいので電子のもつスピンはほとんど同じ方向を向く。(偏極される)この系に特定の周波数のマイクロ波を照射すると標的核と電子が対になりマイクロ波を吸収し互いのスピンの向きを反転させる。電子のスピンはすぐ元の状態に戻り別の原子核のスピンを偏極させることができる。NMR では標的の偏極度を測定する。

## 2.2 希釈冷凍器

### 2.2.1 希釈冷凍器(Dilution Refrigerator)

極低温をつくるために実際使用する希釈冷凍器(Dilution Refrigerator)は図 1 のようになっている<sup>3</sup>He ガスを循環させる<sup>3</sup>He 系と<sup>3</sup>He を予備冷却して液化させる<sup>4</sup>He 系の二つに分けられる。<sup>4</sup>He 系は Separator、Evaporator から構成される。液体<sup>4</sup>He が Separator に供給され溜められると Separator は 4.2K まで冷却される。このとき Separator 内の<sup>4</sup>He が液体部分と気体部分に分けられ気体部分は排気される。Separator に溜まった<sup>4</sup>He の一部は Evaporator に供給されポンプで排気される。その際<sup>4</sup>He は蒸発熱を奪い Evaporator を 2.0K まで冷却する。<sup>3</sup>He 系は Separator、Evaporator の中を通り、Still、Heat Exchanger、Mixing Chamber を通って Heat Exchanger の外部、Still へと進む。この中を<sup>3</sup>He が通り、Separator、Evaporator でそれぞれ 4.2K、2.0K に予備冷却される。さらに Heat Exchanger を通り Mixing Chamber に達し最後は Still から排気される。排気された<sup>3</sup>He は循環する。Still で<sup>3</sup>He を排気することで希釈冷凍(次に詳しく説明する)が連続的に起こる。それにより<sup>3</sup>He は Still で 0.7K、Mixing Chamber で 0.1K まで冷却される。

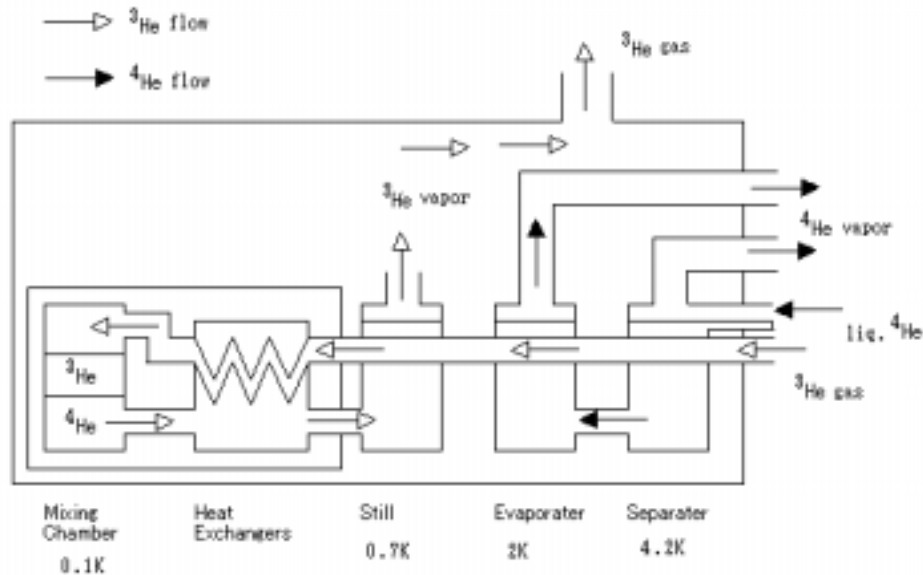


図 1. 希釈冷凍器(Dilution Refrigerator)

### 2.2.2 希釈冷凍法(Dilution Refrigeration)

動的偏極に必要な極低温をつくるために ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ 希釈冷凍法を用いる。これはフェルミ粒子である ${}^3\text{He}$ とボーズ粒子である ${}^4\text{He}$ の性質の違いを使って低温をつくり出す方法である。1気圧では ${}^4\text{He}$ は4.2Kで液体になり2.17K以下になると粘性抵抗が0になり、いわゆる超流動状態になる。 ${}^3\text{He}$ は3.5Kで液体になる。 ${}^3\text{He}$ はフェルミ粒子なので超流動にはならない。 ${}^3\text{He} + {}^4\text{He}$ 混合液は0.87K以下で ${}^3\text{He}$ 濃厚相と ${}^3\text{He}$ 希薄相との2相に分離する。 ${}^3\text{He}$ 濃厚相はほぼ純粋な ${}^3\text{He}$ で ${}^3\text{He}$ 希薄相は0Kであっても超流動状態の ${}^4\text{He}$ の中に ${}^3\text{He}$ が6.4%溶けて飽和する。2相に分離した状態は上に ${}^3\text{He}$ 濃厚相、下に ${}^3\text{He}$ 希薄相ここで ${}^3\text{He}$ と ${}^4\text{He}$ の沸点はそれぞれ、3.5K、4.2Kなのでその違いを利用して ${}^3\text{He}$ を ${}^3\text{He}$ 希薄相からポンプで強制的に排気すると ${}^3\text{He}$ 希薄相での平衡状態を保つために ${}^3\text{He}$ 濃厚相から ${}^3\text{He}$ 希薄相へ ${}^3\text{He}$ が拡散する。この拡散過程における希釈熱は吸熱反応になるのでこの系の温度が下がる。

## 2.3 最終熱交換器(Heat Exchanger)

Still-Mixing Chamber 間にあるのが最終熱交換器(Heat Exchanger)である。Heat Exchanger では希釈冷凍器が作動中内側に  $^3\text{He}$ 、外側に  $^3\text{He} + ^4\text{He}$  が流れていて  $^3\text{He}$  から  $^3\text{He} + ^4\text{He}$  への熱交換をするのが目的である。よって Heat Exchanger の素材はできるだけ熱伝導の良いものが望ましい。

# 第 3 章 Heat Exchanger の製作

## 3.1 設計

希釈冷凍器の Heat Exchanger 取り付け部分及びシールドの形状上 Heat Exchanger は円形にしなければならない。希釈冷凍器、シールドのサイズは図 2 の通りである。

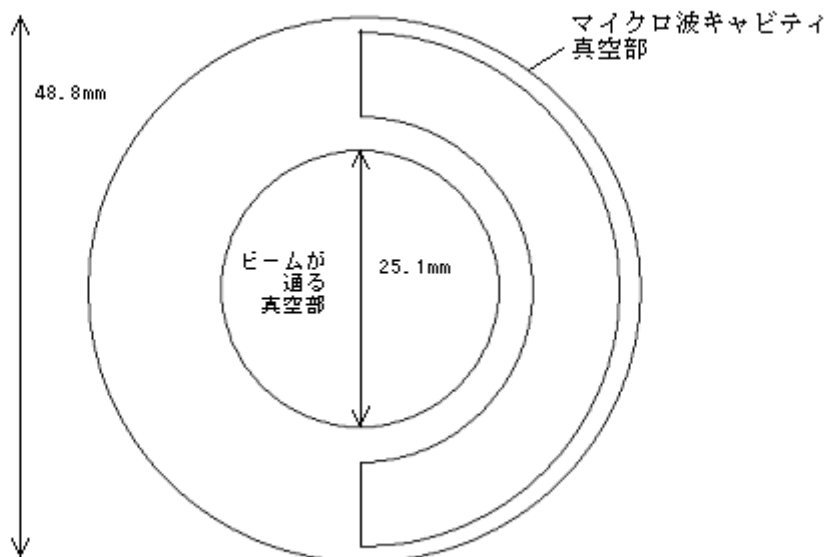


図 2. 希釈冷凍器、シールドのサイズ



Heat Exchanger には熱伝導のよい銅を使用する。内側を流れる  $^3\text{He}$  と外側を流れる  $^3\text{He} + ^4\text{He}$  が銅を通して熱交換するので  $^3\text{He}$  と銅、 $^3\text{He} + ^4\text{He}$  と銅が接する面積はより広いほうが良い。図 3 のように銅パイプを束にし円形にしたものにチューブを取り付けられるように加工する。それを Still-Mixing Chamber 間につなげられるようにできれば完成である。

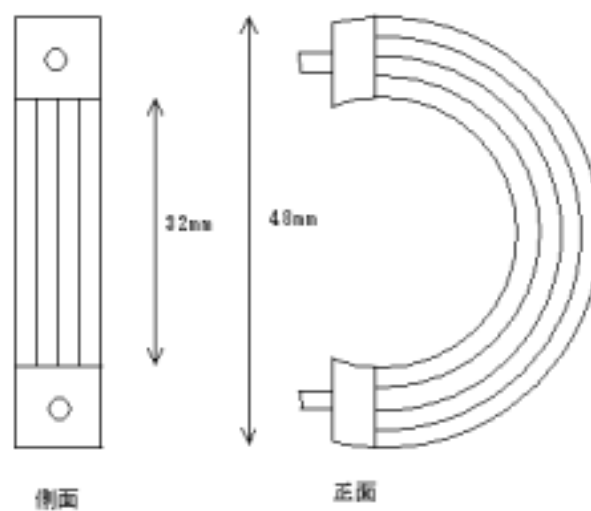


図 3. Heat Exchanger 完成図

## 3.2 製作工程

テフロンチューブに切れ目を入れ角パイプ型に成型

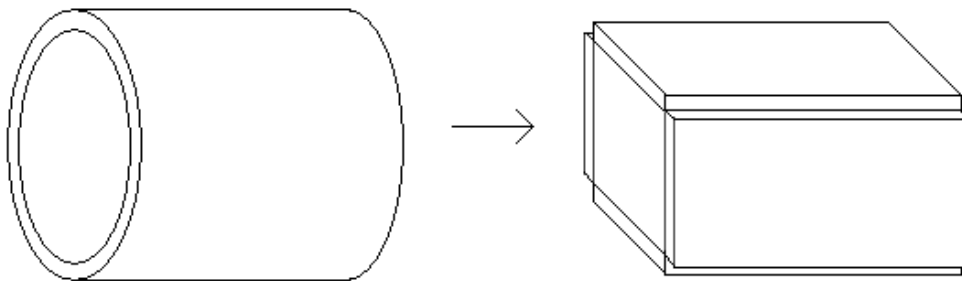


図 4. テフロンチューブ成型

銅パイプを入れる

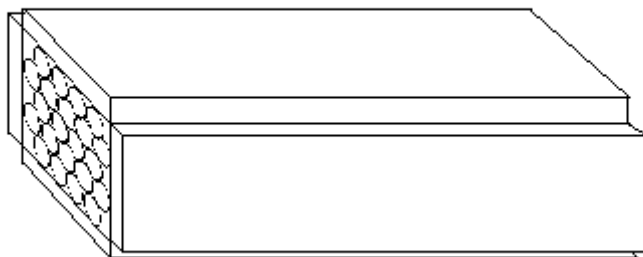


図 5. 銅パイプ挿入

テフロンチューブに切れ目を入れ円型に成型

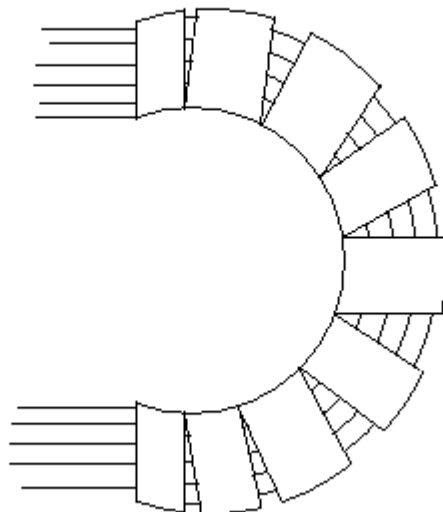


図 6. 銅パイプ成型

端にスタイクキャストをつける

バンドソーでC型に切断

銅パイプの端の穴をスティックのりでふさぐ

銅板を 9mm 四方にカットして穴を空ける

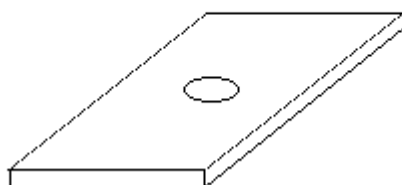


図 7. 銅板

銅板に煙突を銀ろう付け（エンドキャップ）

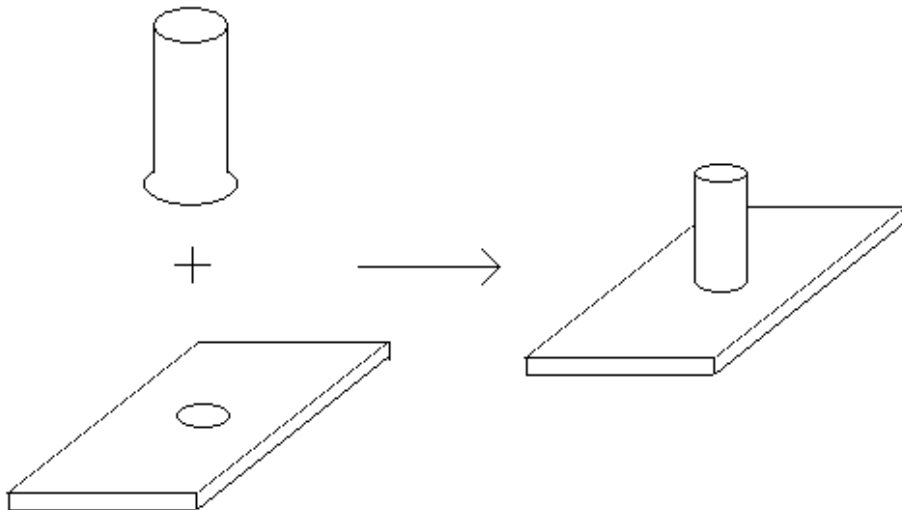


図 8. エンドキャップ

アルミ角パイプを 5mm 長にカット

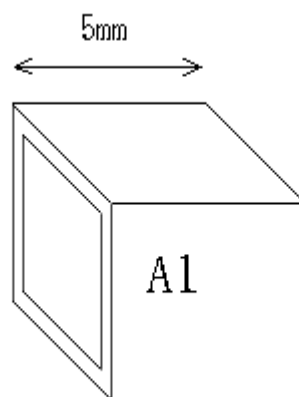


図 9. アルミ角パイプ

銅パイプとエンドキャップの間に隙間をつくるためテフロン板を 8mm 四方にカットしアルミ角パイプにはめ込む

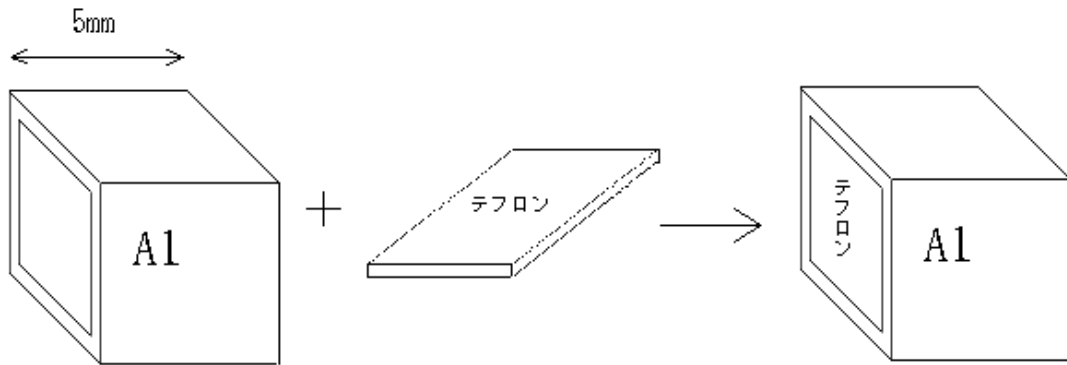


図 10. テフロン板のはめ込み

銅パイプの端にアルミ角パイプをスタイキャストでつける

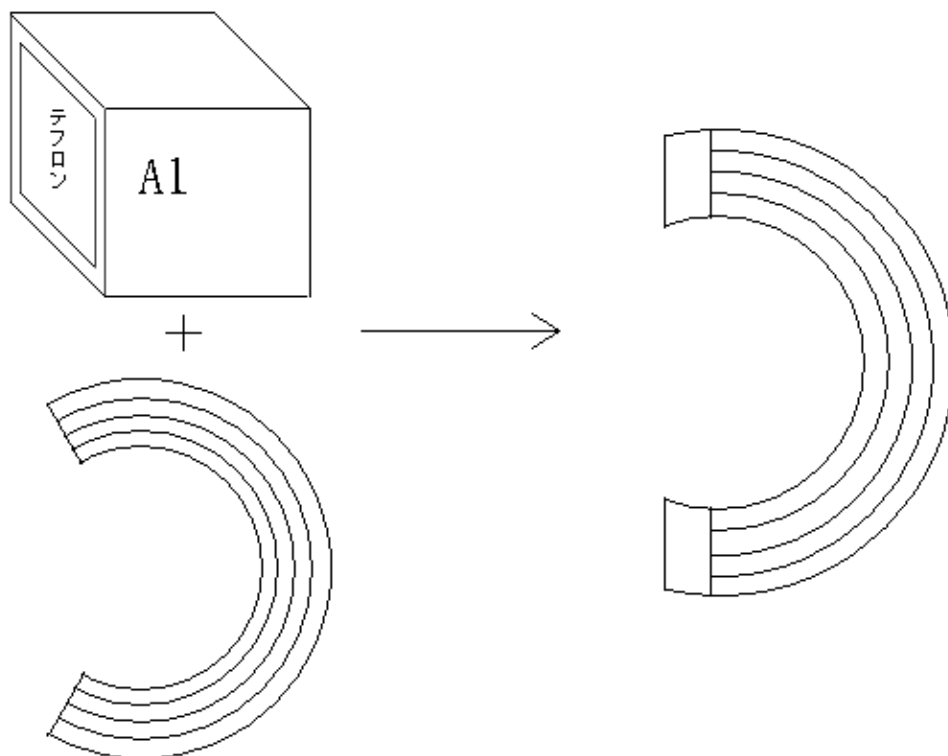


図 11. アルミ角パイプ装着

テフロン板をはずし銅パイプのスティックのりを取り除く  
エンドキャップをアルミ角パイプに接着剤でつける

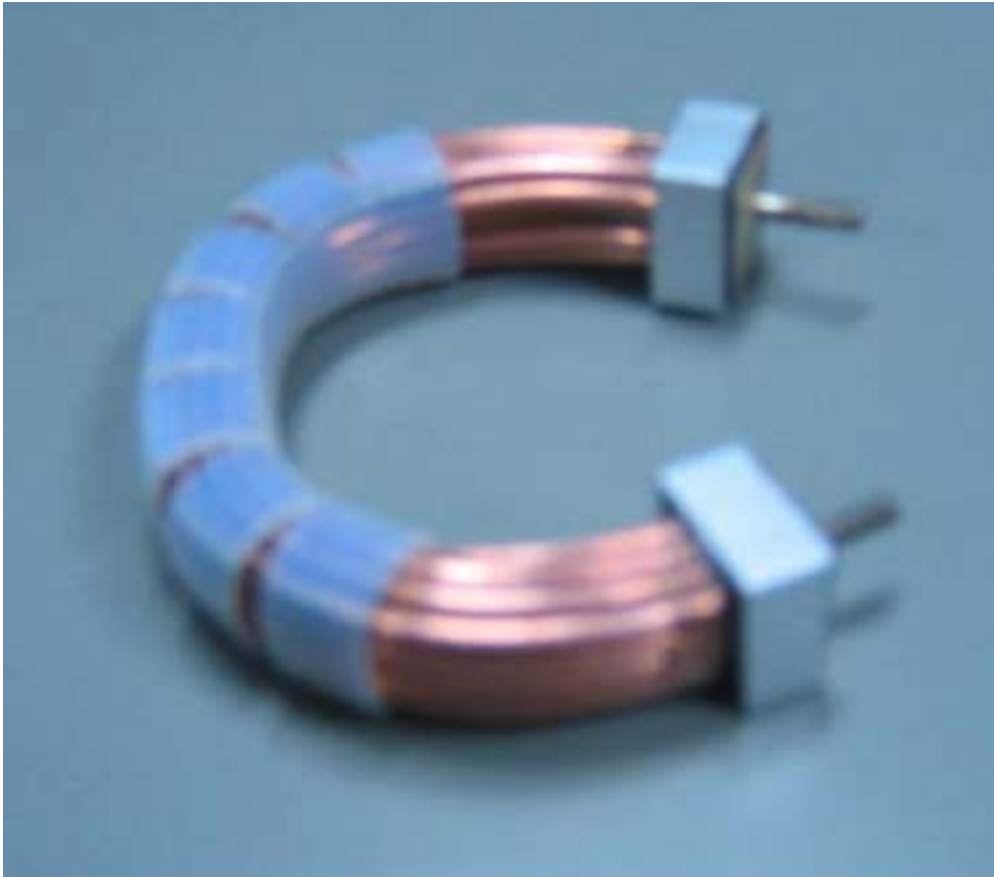


図 12. Heat Exchanger

水中でエンドキャップにエアコンプレッサーから空気を流し漏れがないか  
チェックして完成

### 3.3 材料

#### 銅パイプ

長さ 1m  
内径 1.1mm  
外径 1.5mm

#### アルミ角パイプ

内辺 8mm  
外辺 10mm

#### 銅板

厚さ 0.5mm

#### テフロン板

厚さ 1mm

#### テフロンチューブ

内径 8mm  
外径 9mm

#### フェルール

材質 錫メッキ銅製  
長さ 8mm  
内径 1.5mm  
外径 1.7mm  
tyco Electronics/AMP 社製

#### スタイキャスト（接着剤）

型 1266/A 1266/B  
日本エイブルスティック株式会社製

#### スティックのり

トンボ鉛筆株式会社製

## 第4章 性能評価

### 4.1 熱伝導

熱量が温度の高い領域から温度の低い領域へ移動することを熱伝導という。その際の単位時間あたりの熱量の移動速度は熱伝導する物質の種類による。一般的に低温になるほど熱伝導は悪くなる。また熱伝導に関して厚さ 1m の板の両端に 1 の温度差があるときその板の単位面積を通して単位時間に流れる熱量を熱伝導率という。熱伝導率は固体、液体、気体の順に高く、低温で低くなる。

### 4.2 カピッツア抵抗（境界面抵抗）

Heat Exchanger では希釈冷凍器が作動中に内側と外側にはそれぞれ  $^3\text{He}$  と  $^3\text{He} + ^4\text{He}$ （混合液）が流れている。ここで熱伝導の際、銅と  $^3\text{He}$ 、銅と  $^3\text{He} + ^4\text{He}$  の境界面にはカピッツア抵抗という熱を伝わりにくくする熱抵抗が生じる。特徴としてはカピッツア抵抗は絶対温度  $T$  の 3 乗に反比例するので極低温においては熱抵抗が莫大に大きくなり熱伝導が悪くなる。

### 4.3 Heat Exchanger の熱量速度

Heat Exchanger の性能とはどれだけ熱交換できるかである。よって単位時間あたりにどれだけの熱量が Heat Exchanger を通して伝わるかを調べる必要がある。銅部分及び境界面での熱量速度（単位時間あたりに流れる熱量）を計算し Heat Exchanger 全体での熱量速度を求める。



#### 4.3.1 Cu 中での熱量速度

物質中の熱量速度  $\dot{Q}$  は

$$\dot{Q} = \kappa \frac{S\Delta T}{L} \dots (1)$$

$\dot{Q}$  : 熱量速度[J/s]

$\kappa$  : 熱伝導率[W/m · K]

L : 物質の厚さ[m]

T : 物質の両端の温度差[K]

S : 熱伝導する面積[m<sup>2</sup>]

で表される。

熱伝導率  $\kappa$  は物質の種類にも依るがその物質の温度にも依る。一般的に温度が下がれば熱伝導率も下がる。今 Heat Exchanger で温度は 0.3~0.7K である。

また 0.3K での Cu の熱伝導率  $\kappa$  は

$$\kappa = 300 \text{ [W/m} \cdot \text{K]}$$

と知られている。

今、熱量速度を考える際に熱伝導をする銅はパイプなのでその表面積は内側と外側とで違って来る。そこで銅パイプの内径と外径との平均でその表面積を計算する。さらに Heat Exchanger は銅パイプが 22 本の束で半円状である。Heat Exchanger の内側の銅パイプと外側の銅パイプでもまた長さが違って来るのでそこでも Heat Exchanger の内径と外径の平均をとる。また物質の厚さは銅パイプの内径と外径との差の半分である。

(1)式より一つの Heat Exchanger での熱量速度は  $T = 0.3K$  において

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{Cu} &= 300 \times \frac{1.3 \times 10^{-3} \times \pi \times 4 \times 10^{-2} \times \pi \times \frac{1}{2} \times 22}{0.2 \times 10^{-3}} \times \Delta T \\ &= 8.468 \times 10^3 \times \Delta T \\ &\cong 8.47 \times 10^3 \times \Delta T \dots (2)\end{aligned}$$

と与えられる。

#### 4.3.2 境界面での熱量速度

一般に接触している二つの物質の温度差  $T$  とカピツア抵抗  $R_k$  の関係は

$$\Delta T = R_k \dot{Q} \dots (3)$$

で与えられる。

Heat Exchanger で考える場合  $T$  は銅と液体ヘリウムとの温度差である。

またカピツア抵抗  $R_k$  は

$$R_k = \frac{a}{A} T^{-3} \dots (4)$$

$R_k$  : カピツア抵抗[K/W]

$a$  : 物質に依る定数[m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>/W]

$A$  : 接触面積[m<sup>2</sup>]

$T$  : 境界面の絶対温度[K]

で与えられる。

Heat Exchanger では内側に  ${}^3\text{He}$  外側に  ${}^4\text{He}$  が流れている。実験値により Cu と  ${}^3\text{He}$  間の境界について定数  $a$  は  $0.02[\text{m}^2\text{K}^4/\text{W}]$ 、Cu と  ${}^3\text{He} + {}^4\text{He}$  間の境界については  $0.05[\text{m}^2\text{K}^4/\text{W}]$  である。

よって

Cu と  ${}^3\text{He}$  間のカピッツア抵抗  $R_{k.in}$  と

Cu と  ${}^3\text{He} + {}^4\text{He}$  間のカピッツア抵抗  $R_{k.out}$  の値は(4)式より

$$\begin{aligned} R_{k.in} &= \frac{0.02}{1.1 \times 10^{-3} \times \pi \times 4 \times 10^{-2} \times \pi \times \frac{1}{2} \times 22} \times T^{-3} \\ &= 4.1868 \times T^{-3} \\ &\cong 4.187 \times T^{-3} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{k.out} &= \frac{0.05}{1.5 \times 10^{-3} \times \pi \times 4 \times 10^{-2} \times \pi \times \frac{1}{2} \times 22} \times T^{-3} \\ &= 7.6758 \times T^{-3} \\ &\cong 7.676 \times T^{-3} \end{aligned}$$

(2)式を変形して

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_k} \dots (5)$$

Cu と  ${}^3\text{He}$  間の熱量速度  $\dot{Q}_{in}$  と Cu と  ${}^3\text{He} + {}^4\text{He}$  間の熱量速度  $\dot{Q}_{out}$  は

Cu と  ${}^3\text{He}$  の温度差を  $\Delta T_{in}$ 、Cu と  ${}^3\text{He} + {}^4\text{He}$  の温度差  $\Delta T_{out}$  とすると

(5)式より

$$\dot{Q}_{in} = \frac{\Delta T_{in}}{R_{k.in}} \qquad \dot{Q}_{out} = \frac{\Delta T_{out}}{R_{k.out}}$$

と表される。

また二つの境界面を合わせた熱量速度  $\dot{Q}_{boundary}$  (以下  $\dot{Q}_b$ ) は Cu と  $^3\text{He}$  間、  
Cu と  $^3\text{He} + ^4\text{He}$  間での熱伝導が平衡しているとする

$$\dot{Q}_b = \frac{\Delta T_{in}}{R_{k.in}} = \frac{\Delta T_{out}}{R_{k.out}} \dots (6)$$

また  $\Delta T$  は  $^3\text{He}$  と  $^3\text{He} + ^4\text{He}$  の温度差なので

$$\Delta T_{in} + \Delta T_{out} = \Delta T \dots (7)$$

(6)式より

$$\Delta T_{in} = \frac{R_{k.in}}{R_{k.out}} \Delta T_{out} \dots (8)$$

(8)式を(7)式に代入すると

$$\frac{R_{k.in}}{R_{k.out}} \Delta T_{out} + \Delta T_{out} = \Delta T$$

$$\Delta T_{out} \left( 1 + \frac{R_{k.in}}{R_{k.out}} \right) = \Delta T$$

$$\Delta T_{out} = \frac{\Delta T}{\left( 1 + \frac{R_{k.in}}{R_{k.out}} \right)} \dots (9)$$

(9)式を(6)式に代入すると

$$\dot{Q}_b = \frac{1}{R_{k.out}} \cdot \frac{\Delta T}{\left( 1 + \frac{R_{k.in}}{R_{k.out}} \right)} = \frac{\Delta T}{R_{k.in} + R_{k.out}} \dots (10)$$

よって二つの境界面を合わせた熱量速度  $\dot{Q}_b$  は(10)式より

$$\begin{aligned}\dot{Q}_b &= \frac{\Delta T}{R_{k.in} + R_{k.out}} \\ &= \frac{\Delta T}{4.187 \times T^{-3} + 7.676 \times T^{-3}} \\ &\cong 8.43 \times 10^{-2} \times T^3 \times \Delta T \dots (11)\end{aligned}$$

### 4.3.3 全体での熱量速度

Heat Exchanger のある Still-Mixing Chamber 間の温度は 0.3 ~ 0.7K なのでその範囲でカピッツア抵抗が最も小さくなる 0.7K での  $\dot{Q}_b$  は(11)より

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{b(T=0.7)} &= 8.43 \times 10^{-2} \times (0.7)^3 \times \Delta T \\ &\cong 2.89 \times 10^{-2} \times \Delta T \dots (12)\end{aligned}$$

Still-Mixing Chamber 間に Heat Exchanger は 16 個取り付ける。Heat Exchanger 各点での  $^3\text{He}$  と  $^3\text{He} + ^4\text{He}$  の温度差  $T$  を

$$\Delta T = 0.1\text{K} \text{ とすると(2)(12)より}$$

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{Cu} &= 8.47 \times 10^3 \times 10^{-1} \\ &= 8.47 \times 10^2 \text{ [J/s]}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{b(T=0.7)} &= 2.89 \times 10^{-2} \times 10^{-1} \\ &= 2.89 \times 10^{-3} \text{ [J/s]}\end{aligned}$$

この  $\dot{Q}_{Cu}$  の値は  $T=0.3K$  のときであり、そのとき最も小さくなる。

よって、このとき明らかに

$$\dot{Q}_b \ll \dot{Q}_{Cu}$$

である。

カピッツア抵抗は温度が低くなればなるほど大きくなり、その結果熱量速度が小さくなるので  $0.7K$  以下でも同様である。 $\dot{Q}_{Cu}$  についても Heat Exchanger 間の温度差  $0.3 \sim 0.7K$  では  $0.3K$  で最低なのでそれ以上の温度でも同じことが言える。

よって Cu での熱伝導が良くても境界面での熱伝導が悪いので結局この系全体の熱量速度  $\dot{Q}_{HeatExchanger}$  (以下  $\dot{Q}_{H.E.}$ ) は  $\dot{Q}_{Cu}$  を無視して

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{H.E.} &\cong \dot{Q}_b \\ &= 8.43 \times 10^{-3} \times T^3 \quad [J/s] \end{aligned}$$

Still-Mixing Chamber 間の Heat Exchanger の温度は  $0.7K \sim 0.3K$  まで徐々に下がる。ここで Heat Exchanger 16 個の周辺の温度変化を一定とすると表.1 のような温度分布を想定できる。

各点での  $\dot{Q}_{H.E.}$  は

温度[K]	熱量速度[mJ/s]
0.675	2.593
0.65	2.315
0.625	2.058
0.6	1.821
0.575	1.603
0.55	1.403
0.525	1.22
0.5	1.054
0.475	0.903
0.45	0.768
0.425	0.647
0.4	0.54
0.375	0.445
0.35	0.361
0.325	0.289
0.3	0.228

表 1. Heat Exchanger 各点の熱量速度

すべて足し合わせると Heat Exchanger 全体の熱量速度になる。

よって Heat Exchanger 全体の熱量速度  $\dot{Q}_{All.H.E.}$  は

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{All.H.E.} &= 18.248 \times 10^{-3} \text{ [J/s]} \\ &\cong 18.2 \text{ m[W]}\end{aligned}$$

## 4.4 評価

製作した Heat Exchanger が正常に機能するかどうかは Heat Exchanger 内を流れる  $^3\text{He}$  の単位時間あたりの流量  $V[\text{mol/s}]$  に対してどのくらいの量まで熱交換しきれるかを調べる必要がある。

$^3\text{He}$  のモル比熱  $C_v$  は  $0.3\text{K}$  で

$$C_v = 5 \times 10^3 [\text{mJ/mol} \cdot \text{K}]$$

よって

$$\dot{Q}_{\text{All.H.E.}} = C_v \times V \times \Delta T$$

を  $V$  について解くと

$$V = \frac{\dot{Q}_{\text{All.H.E.}}}{C_v \times \Delta T}$$

両端の Heat Exchanger での温度差  $T$  は  $0.4\text{K}$  より

$$\begin{aligned} V &= \frac{18.2 \times 10^{-3}}{5 \times 10^3 \times 10^{-3} \times 0.4} \\ &\cong 1.516 \times 10^{-3} \\ &\cong 15.2 [\text{m} \cdot \text{mol/s}] \end{aligned}$$

製作した Heat Exchanger は  $^3\text{He}$  の流量が  $15.2\text{m}[\text{mol/s}]$  まで熱交換しきれる。実際の流量は  $1[\text{m} \cdot \text{mol/s}]$  なので使用しても何の問題もない。



## 第5章 考察

### 5.1 考察

Heat Exchanger 製作に関して何度も試作品を作り今回のような製作工程となった。製作工程の中で最も気をつけなければならないのがスタイキャストを使用するときである。すべて手作業なのですべて全く同じように作るのは難しい。作った中のいくつかは銅パイプのまわりに接着剤が多くついているなど思わぬ手違いがあるかもわからないので、できるだけ悪い条件で計算してみたがそれでも最低限必要な冷却能力の約 15 倍の Heat Exchanger を製作できたはずである。また数値計算において Heat Exchanger 各点の  $^3\text{He}$  と  $^3\text{He} + ^4\text{He}$  の温度差は 0.1K として計算したが実際の詳しい温度差の値があればより正確な Heat Exchanger の冷却能力を計算できると思う。

## 第6章 まとめ

### 6.1 まとめ

使用する希釈冷凍器の Heat Exchanger での最低限必要な冷却能力は 1mW である。それに対して第 4 章で述べたように十分な冷却能力をもつ最終熱交換器(Heat Exchanger)を製作することができた。

#### 参考文献

Frank Pobell Matter and Methods at Low Temperatures Second Edition